



认知无线电传感器网络 CSMA 协议中 主用户和次用户的性能分析

刘莹¹, 郑黎¹, 黎远松²

(1. 四川工程职业技术学院电气信息工程系, 四川 德阳 618000;

2. 四川理工学院计算机学院, 四川 自贡 643000)

摘要: 针对认知无线电传感器网络(CRSN)中物理层特性高度可变带来的性能不确定性, 在 CRSN 中定义了两种基础性能指标(带宽和时延), 并分析了基于载波侦听多路访问(CSMA)的介质访问控制协议的性能。首先, 在给定的主用户(PU)业务模型下利用 CSMA 算法估计单个次级用户(SU)的潜在带宽; 然后, 推导在不同业务信道同时传输多个 SU 的聚合带宽; 最后, 利用优先级队列模型 M/G/C 估计介质访问中的时延。性能分析表明, 通过使用分布式信道协作结合 CSMA 的并发传输, 聚合带宽可增加 5 倍, 利用不同业务信道同时传输明显降低了分组时延。

关键词: 认知无线电; 传感器网络; 带宽估计; 时延估计; 主用户; 次用户

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016093

Performance evaluation of primary user and secondary user based on CSMA protocol in CRSN

LIU Ying¹, ZHENG Li¹, LI Yuansong²

1. Department of Electrical Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China

2. School of Computing, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China

Abstract: For the problem of uncertainty owing to the highly variable physical layer characteristics in cognitive radio sensor networks (CRSN), two fundamental performance metrics (bandwidth and delay) were formulated and the performance of medium access control protocol based on CSMA was analyzed. Firstly, CSMA algorithm was used to estimate potential bandwidth of secondary user under the given PU traffic model. Then, aggregated bandwidth of multiple SU simultaneous transmitting within different business channels was derived. Finally, the priority queue model M/G/C was used to analyze the delay of MAC. Performance analysis shows that dedicating a common control channel for SU enhances their aggregated bandwidth approximately five times and the packet delay reduces significantly through the possibility of concurrent transmissions on different traffic channels.

Key words: cognitive radio, sensor network, bandwidth estimation, delay estimation, primary user, secondary user

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-03-08

基金项目: 四川省高校重点实验室基金资助项目(No. 2014WZY05); 四川省智慧旅游研究基地规划基金资助项目(No. ZHY15-01)

Foundation Items: Fund of Key Laboratories of Universities in Sichuan Province (No. 2014WZY05), Plan Fund of Wisdom Tourism Research Base in Sichuan Province (No. ZHY15-01)

1 引言

CRSN(cognitive radio sensor network)^[1]是认知无线电与传感器网络的结合,相比无线传感器网络(wireless sensor network, WSN),CRSN 不仅可以提高网络资源的利用效率,提供无线电通信兼容性和自适应于无线网络资源的动态变化,更能适应复杂电磁环境下通信资源和通信手段的限制与反限制、攻击与保护等。因此,CRSN 已得到各界的关注。

由于 CRSN 缺乏专用频段,总是可以动态感知频谱的访问,因此必须阻止次级用户以确保较好的网络性能。由于连续变化的物理层特性和叠置协议的性能依赖带宽和时延^[2],因此估计认知无线电用户的性能具有重要的意义。若传输或路由层的流准入控制允许带宽自发增加的流,服务质量(quality of service, QoS)可能会急剧恶化,因此提供 SU 吞吐量和时延的估计是不可或缺的,使其长时间维持通信协议的性能^[3],并逐渐减轻动态频谱访问的缺陷。

本文在给定主用户(primary user, PU)业务模型下的带宽和时延指标方面执行了次级用户(secondary user, SU)的性能分析,并研究其与各种因素的关系。采用了基于载波侦听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA)的介质访问控制(media access control, MAC)协议,使用专用控制信道来协商 SU 发送方与接收方之间的业务信道利用情况。SU 可利用认知无线电同时访问公共干扰区域中不同的业务信道,得到两种性能指标。其中,PU 属于一个高优先级队列,而 SU 组成一个低优先级队列,通过服务器或信道服务队列,即仅当队列中 PU 数目少于信道数目时,服务低优先级队列。尽管 SU 的带宽有限,通过将分布式协作并入 CSMA 方案, SU 可以并发传输,聚合吞吐量可增加 5 倍,时延显著降低。

许多参考文献对时延^[4]和吞吐量^[5]估计方面的性能进行了分析,但很少关注通过公共控制信道运行的认知无线电性能分析^[6]。例如,参考文献[7]将 PU 和 SU 建模为优先级队列,给定 PU 最高优先级,并提出了基于 CSMA 的自组织网络介质访问控制协议性能的分析方案^[8],但该方案没有在 CRSN 中结合动态信道访问。参考文献[9]提出了一种包含一个主用户和多个次级用户的 M/G/1 系统,在以业务和信道条件为函数的时间段内分析单信道或服务上的时延和吞吐量,基于该分析,次级终端可视作时延终端,利用放大和转发时分多址(time division multiple address, TDMA)协议辅助主通信,该分析不能应用于节点易受许多

PU 干扰的 CRSN,且 TDMA 很难在 CRSN 中实现。参考文献[10]研究了 SU 的数据分组时延,分析了比 SU 优先级更高的队列。参考文献[11]通过频谱感知和重传进行性能分析,利用随机网络演算在各种重传方案下分析主用户和次级用户的性能分布边界,然后基于随机网络演算进行性能分析,获得了积存和时延边界的表达式。这些研究基于任意给定时间仅服务单一队列的现象,忽略了公共干扰区域中同时访问多信道的潜力。参考文献[12]使用流队列理论研究了 SU 的时延,分析了 SU 的稳定状态队列长度及基于 SU 的两个认知无线电接口,但由于节点的大小和成本问题,无法应用于 CRSN。

在次级用户吞吐量分析性能方面,一些介质访问控制算法按照它们的设计方法分析吞吐量。例如,参考文献[13]通过一个活跃用户限制带宽,且同时实现多空闲信道的可用性,以获得认知无线电用户的潜在带宽。基于功率和速率自适应 CSMA 的协议^[14]分析了潜在带宽,可同时与 PU 通信,然而信道同时访问的探索不能用于聚合带宽。参考文献[15]分析了 SU 性能,将信道建模为抢占式队列服务器,允许 PU 从 SU 抢占信道,但只研究了时延,未研究带宽。基于上述分析,现有的方案不能以更严格的方式提供 SU 性能分析,无法促进高层协议的运行。因此,本文在带宽和时延方面执行了次级用户的性能分析。

2 系统建模

本节描述了用于分析性能的认知无线网络的基本假设,与 SU 不同,PU 是频谱的多特权用户。SU 节点动态感知频谱信道,并将频谱信道切换至与 PU 通信的空闲信道。SU 节点使用一个专门的公共控制信道协商潜在控制信道的利用情况,诱导公共控制信道的竞争,从而协调数据信道。这与 IEEE 820.11 MAC 中数据通信共享介质不同,否则 SU 将不知道它们邻居利用当前信道的情况。

2.1 网络模型

假设传输半径为 r_m 的网络中部署了 N 个 SU,在 $A \text{ m}^2$ 区域内,由 N/A 获得节点密度 ρ ,且节点配备有 1 个单一的接口组件,按机会切换访问 C 个业务信道和 1 个公共控制信道,除了 SU,还有 M 个 PU,如图 1 所示。可认为认知无线网络均匀,其活跃度呈指数分布,on 状态持续 $\tau_{on} \text{ s}$,off 状态持续 $\tau_{off} \text{ s}$,平均到达率为 λ_{po} 。因为每个 PU 独立到达,每次转换遵循泊松分布,因此,on 和 off 周期呈指数分布^[16]。本文还假设 PU 的信道不饱和,使得 $M\tau_{on} < C(\tau_{on} + \tau_{off})$ 。

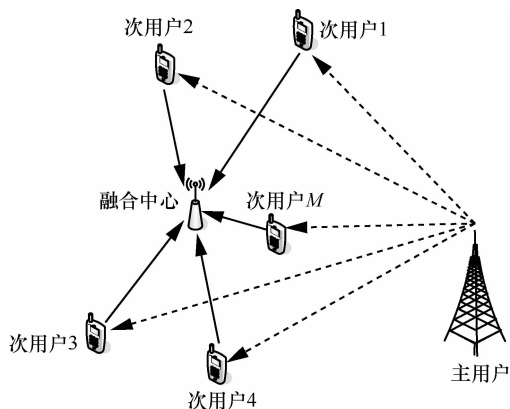


图1 认知无线网络中的集中协作频谱检测

令 SU 为到达率为 λ_s 的泊松分布,假设 SU 的传输方式为非抢占式,由于无线收发器不能同时发送和接收,即 SU 在释放信道之前完成传输。因此,可能会对 PU 产生干扰或延迟 PU 的传输。可以通过合适的 SU 传输功率进行控制^[8]。

2.2 基于 CSMA 的 MAC 协议

假设 SU 用 CSMA 进行介质访问,并用于评估 CRSN 中 MAC 地址的性能。基于 CSMA 的 MAC 协议是 IEEE 802.11 MAC 的自定义版本,该 MAC 用于解决 SU 之间业务协商的公共控制信道上的竞争。节点试图发送一个数据分组,首先在信道列表选择一个空闲信道,并初始化其频谱感知过程。找到空闲信道后,停止感知并将结果报告给介质访问算法。假设平均感知周期为 $\bar{T}_s$,用于寻找空闲信道^[7]。MAC 算法如下所示:

- 传输数据的节点 n_i 在物理层初始化频谱感知算法,并确定在较低噪声或较高空闲率时 C 个信道之间最适合的业务信道;
- 转向公共控制信道并感知载波,若载波忙则运行指数退避算法,等待随机退避周期;
- 若 n_i 找到空闲信道,则等待分布式帧间隔周期,并发送包含空闲信道 h_i 的业务信道请求信标;
- 节点 n_j 接收 C-RTS 信标,并在空闲信道列表中寻找可用的 h_i 或进行频谱感知,确定其状态,这可能花费 $\bar{T}_s$ s;
- 若 n_j 找不到空闲信道 h_i ,则报告自己优选的信道 h_j ;
- h_j 等待短帧间隔(SIFS)或 $\bar{T}_s$ 后,每当最大值是 $\max(\text{SIFS}, \bar{T}_s)$ 时,发送 CCTS 信标到 n_i ,以获知信道 h_i 的可用性并转向 h_i ;
- 当 h_i 接收到 CCTS 并找到通知的信道 h_i 时,若 $h_i=h_j$,则转向 h_i ,否则为 h_j 初始化频谱感知并重复该过程;

- 两个节点均转向协商的业务信道 h_i ,由 n_i 进行数据传输,若感知到信号空闲, n_i 等待 DIFS 周期并发送 T_i 周期的 data 帧;否则转向公共控制信道,在另一信道重复该过程;
- n_j 接收帧,等待 SIFS 周期,发送 D-ACK 消息,转向公共信道;
- 任意接近 n_i 的节点监听 C-RTS,不利用请求信标中学习到的信道 h_i ,类似地监听 C-CTS 的节点,在它们的下一帧传输中不访问信道 h_j 。

因此,一对 SU 通过公共控制信道协商业务信道后,切换到允许其他竞争者初始化协商的业务信道,并在业务信道上参与传输。因此,允许 SU 同时访问空闲信道,使它们有机会增加聚合带宽。

3 基于 CSMA 的 MAC 协议性能分析方案

本文侧重于研究 CRSN 中的带宽和时延,并利用基于 CSMA 的 MAC 协议分析其性能。对于带宽估计,推导 PU 业务模型可实现的带宽与 SU 密度以外 PU 密度之间的关系,运用优先级队列分析介质访问中的时延,分配给 PU 的优先级更高,并将其分配到更高优先级的队列。

3.1 带宽分析

基于第 2.2 节描述的 CSMA 算法执行带宽估计,首先评估单个 SU 的潜在带宽,然后推导在不同业务信道同时传输多个 SU 的聚合带宽,给定 PU 业务模型,处于占用状态信道的概率为:

$$p_{\text{on}} = \frac{\tau_{\text{on}}}{\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{off}}} \quad (1)$$

随着 PU 总数的增加,活跃状态的概率依次增加。活跃状态的概率随着信道数目的增加而减少,因此有:

$$P_{\text{on}} = 1 - (1 - p_{\text{on}})^{\frac{M}{C}} \quad (2)$$

类似地,处于空闲状态的信道的概率为 $P_{\text{off}} = 1 - P_{\text{on}}$ 。令 T 为 SU 发送最大帧时的传输周期。

SU 初始化传输时有两种情况:

(1) PU 不活跃且判断接收到的信号时没有误报,则在真实检测到的空闲信道上可达到的数据速率为:

$$b_s(t) = \beta \ln \left(1 + \frac{S_r(t)}{n(t)} \right) \quad (3)$$

$$R_s(t) = (P_{\text{off}} - P_f) \frac{T - \bar{T}_s - \bar{T}_0}{T} b_s(t) \quad (4)$$

其中, P_f 表示虚警率, $\bar{T}_0$ 表示发生在公共控制信道上,

发送器和接收器之间除了 CSMA 开销之外协商业务的平均时间开销,且 PU 可在 T 周期内任意时刻到达,因此,产生的干扰在概率 $1 - e^{-\theta_1 \frac{TC}{\tau_{on}M}}$ 下逐渐收敛于 $(1 - P_{df})T$,其中, θ_1 是缩放因子。

(2) PU 活跃,但由于频谱感知误差, SU 并未检测到。错误感知空闲信道期间实现的数据传输速率 $R_f(t)$ 为:

$$b_f(t) = \beta \ln \left(1 + \frac{S_f^s(t)}{n(t) + S_f^p(t)} \right) \quad (5)$$

$$R_f(t) = (P_{on} - P_d) \frac{T - \bar{T}_s - \bar{T}_0}{T} b_f(t) \quad (6)$$

P_f 表示检测率,整个帧周期内 PU 保持活跃的概率为 $e^{-\theta_1 \frac{TC}{\tau_{on}M}}$ 。

因此, t 时刻任意信道上可实现的数据传输速率 $R(t)$ 为:

$$R(t) = e^{-\theta_1 \frac{TC}{\tau_{on}M}} R_s(t) + \left(1 - e^{-\theta_1 \frac{TC}{\tau_{on}M}} \right) R_f(t) \quad (7)$$

可实现的总速率为 $R_s(t)$ 和 $R_f(t)$ 的总和。

接着计算业务信道协商及 CSMA MAC 中执行传输需要的平均时间开销,给定节点密度,彼此冲突范围内节点数 N_c 在传输范围 r 内为 $\rho \times \pi r^2$ 。因此, CSMA 技术中 N_c 个竞争节点第 k 次成功传输的概率 $p_s(k)$ 为^[11]:

$$p_s(k) = \frac{N_c}{2^k CW_{\min}} \sum_{w=1}^{2^k CW_{\min}} \left(1 - \frac{w}{2^k CW_{\min}} \right)^{N_c-1} \quad (8)$$

所以,载波感知算法中平均退避时延 $\bar{T}_{bo}$ 为^[12]:

$$\bar{T}_{bo} = \sum_{i=1}^Q p_s(i) \frac{\min(2^i CW_{\min}, CW_{\max}) - 1}{2} \delta \quad (9)$$

其中, Q 表示假设介质不可用之前允许的最大重传次数, δ 表示竞争时隙长度,因此,公共控制信道的平均协商时延 $\bar{T}_n$ 为:

$$\bar{T}_n = \bar{T}_{bo} + DIFS + T_{rs} + SIFS + T_{cs} \quad (10)$$

其中, T_{rs} 和 T_{cs} 分别为 RTS 和 CTS 帧时延,表示 SU 在协商数据信道上开始数据传输之前平均花费 $\bar{T}_n$ s。

3.2 时延分析

通过优先级队列系统分析 CRSN 中的时延,在这个系统里,为 PU 设置高优先级队列 (high priority queue, HPQ),为 SU 设置低优先级队列 (low priority queue, LPQ)。假设系统中服务器的数目为可能信道的数目,使得任意服务器可服务任意队列。图 2 表示用于建模 CRSN 的优先级队列系统,数据分组的等待时间包括 3 部分:队列中等待

控制信道访问花费的时间 T_q 、采集和协商数据业务信道的信道竞争时间 T_n 和业务信道上的平均服务时间 (传输时间) T_d 。对于 HPQ 和 LPQ,根据先进先服务 (first coming first service, FCFS) 原则服务数据分组,但仅当 HPQ 中没有数据分组时, LPQ 的数据分组开始传输。已知数据分组依据泊松分布到达,且 CSMA MAC 中数据分组的服务时间呈指数形式,本文利用 M/G/C 系统分析 CRSN 中出现的时延,其中, C 是竞争无线电中允许同时传输的服务器 (信道) 总数。

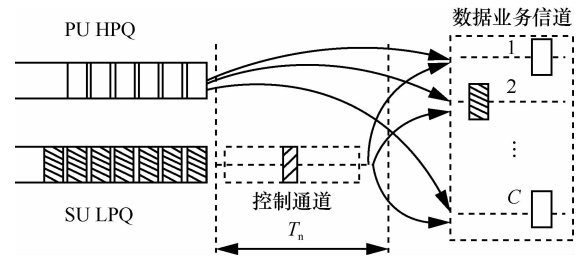


图 2 用于时延分析的 CRSN 优先级队列模型

PU 活跃期间 (即 T_{on}), SU 不可能获得任何传输机会,除非 PU 信号弱或错误检测概率高。因此,由于 C 个信道上 M 个 PU 的非空 HPQ, SU 的等待时间为 $\tau_{on} \times P_{on}$ 。假设 PU 的服务时间 T_a 为 on 周期内扣除 SU 错误检测概率的比例,即 $\tau_{on}(1 - p_m)$,因为 PU 必须等待 SU 帧传输 T_f 完成, HPQ 中 PU 的等待时间为:

$$T_w^p = T_f + T_a \frac{\bar{M}}{C} \quad (11)$$

由费马小定理可知, $\bar{M} = \lambda_p T_w^p$,代入式(11)有:

$$T_w^p = T_f + T_a \frac{\lambda_p T_w^p}{C} \quad (12)$$

其中, $\rho_p = T_a \lambda_p / C$,表示 PU 信道利用系数,即 $T_a = \rho_p C / \lambda_p$,代入式(12)可改写为:

$$T_w^p = \frac{T_f}{1 - \rho_p} \quad (13)$$

对于 SU,到达数据分组的等待时间不仅依赖 HPQ 和 LPQ 中到达的数据分组,且依赖主用户上到达的子序列,因此,计算中必须包括这个时延,所以 SU 的低优先级队列的等待时间为:

$$T_w^s = \bar{T}_n + T_d \bar{N}_s + T_a \bar{M} + \rho_p T_w^s \quad (14)$$

其中, SU 服务时间为 $T_d = T_s + DIFS + T_f + SIFS + T_{ack}$, $\bar{N}_s$ 为 LPQ 的平均大小,当在公共控制信道上协商后 SU 可同时访问业务信道,式(14)中的等待时间为:

$$T_w^s = \bar{T}_n + T_d \frac{\bar{N}_s}{\min(\bar{N}_s, C) + \rho_p T_w^s + \rho_p T_w^s} \quad (15)$$



按照费马小定理,已知 $\bar{N}_s = \lambda_s \bar{N}_c T_w^s$,代入式(15)可得:

$$T_w^s = \rho_p T_w^p + \bar{T}_n + T_d \frac{\lambda_s \bar{N}_c T_w^s}{\min(\bar{N}_c, C) + T_d \lambda_p T_w^s} \quad (16)$$

简化为:

$$T_w^s = \frac{\rho_p T_w^p + \bar{T}_n}{1 - \frac{\rho_s \bar{N}_c}{\min(\bar{N}_c, C) - \rho_p}} \quad (17)$$

其中, $\rho_s = T_d \lambda_s$ 是 SU 的信道利用率,若假设每对竞争 SU 有足够信道数目可用,即 $\bar{N}_c \leq C$,则取 $\min(\bar{N}_c, C)$ 为 $\bar{N}_c$ 。所以,当在公共控制信道上协商后 SU 同时在不同信道发送不同数据时,可获得 SU 在 C 个可能服务器或信道上传输的时延,因此,式(17)可改写为:

$$T_w^s = \frac{\rho_p T_w^p + \bar{T}_n}{1 - \rho_s - \rho_p} \quad (18)$$

因此,由式(18)获得的 SU 的数据分组时延依赖 PU 利用的业务信道以及访问业务信道的控制信道协商周期,具体见表 1。

表 1 模型中的变量及定义

变量	定义
M	PU 的数目
N	SU 的数目
C	数据业务信道的数目
β	业务信道带宽
τ_{on}	PU 活跃传输期间的时间周期
τ_{off}	PU 保持静止期间的时间周期
λ_p	PU 的平均到达率
λ_s	SU 的平均到达率
$S_c^s(t)$	SU 在 t 时刻接收到的信号
$S^p(t)$	SU 在 t 时刻感知到的 PU 的信号强度
$R(t)$	SU 在 t 时刻的数据传输速率
$R^*(t)$	公共干扰区域内多个 SU 获得的聚合数据传输速率
T_{bo}	CSMA 协议中的退避时间周期
CW_{min}	最小竞争窗口尺寸
CW_{max}	最大竞争窗口尺寸

4 性能分析

PU 业务模型的各种参数值见表 2。均匀部署 SU,节点密度随节点传输范围变化而变化,且 PU 随机出现在网络中的不同点,在随机选择的信道上活跃。SU 连续搜索信道可用性并在 MAC 帧传输前保持更新信道列表。本文的贡

献在于 MAC 协议的性能分析而不是 MAC 协议的设计,所有实验分析均在 MATLAB 环境中执行。

表 2 参数设置

参数	取值
PU 的数目 M	20
业务信道的数目 C	20
业务信道带宽 β /MHz	1
PU 平均空闲时间 τ_{off} /s	0.5
PU 平均繁忙时间 τ_{on} /s	0.5
公共控制信道数据传输速率 $B_{cc}/(\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1})$	512
帧周期 T_f /ms	50
最大竞争窗口尺寸 CW_{max}	1 024

4.1 单节点带宽

在 PU 的各种空闲周期 τ_{off} 和工作周期 τ_{on} 值下改变数据帧周期 T_f 可以获得单个 SU 带宽,如图 3 所示,其中, $\tau_{on} = (1 - \tau_{off})s$, $M=20$, $C=20$, $N_c=15$ 。从图 3 中可以看出,刚开始 SU 的带宽随着 T_f 的增加而增加,约 100 ms 处达到最大值,之后随着 T_f 继续增加而降低,减少趋势依赖 τ_{off} 值的大小。 $\tau_{off}=0.8$ 时,降低幅度最大,约 22%。但在 $\tau_{off}=0.2$ 时可忽略,这是由于 SU 传输过程中遇到来自 PU 的干扰,因此 T_f 增加也不影响带宽。假设 SU 节点通过监听公共控制信道获知业务信道的利用情况。在较长帧周期的情况下,业务信道上的传输更容易遇到冲突和干扰,因为新 SU 很有可能不监听控制信道上的 CSMA 消息,故本文没有在业务信道上采用 CSMA。

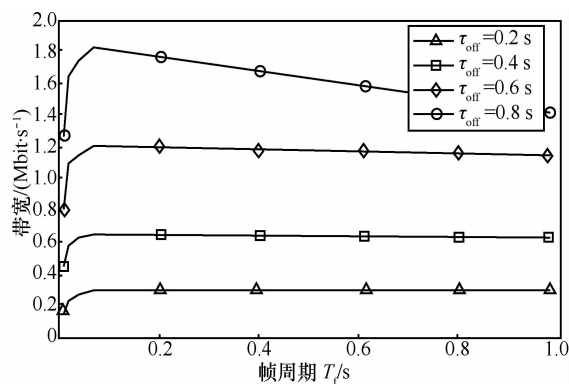


图 3 SU 的单个节点带宽

类似地,通过改变虚警概率 P_f ,各种 PU 传输周期值 τ_{on} 的带宽如图 4 所示,其中, $0.2 \leq \tau_{on} \leq 0.8$,且 $\tau_{off} = 1 - \tau_{on}$ 。从图 4 中可以看出,虚警概率的增加导致带宽变化明显。当 $\tau_{on}=0.8$ s, $P_f=0.1$ 时带宽接近 0,但当 $\tau_{on}=0.2$ s 时,带宽明显

变高。PU 的活动周期或虚警概率越高,带宽越低。因此,为了保证较高的带宽,需要保证较短的 PU 活跃周期和较低的虚警概率。

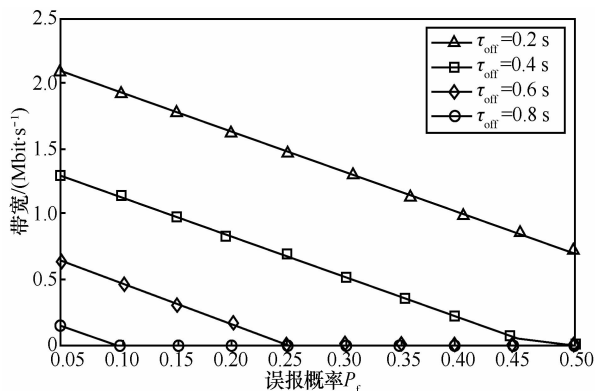


图4 PU 的单个节点带宽

改变空闲周期 τ_{off} 可以获得公共冲突范围内的聚合带宽,如图5所示,其中, $M=20, C=20, N_c=15, T_f=50$ ms。 $\tau_{on}=1$ s 时,聚合带宽随 τ_{off} 的增加而线性增加,但 $\tau_{on}=0.25$ s 时,呈指数增加。获得的聚合带宽是单个 SU 带宽的 5 倍,因此通过在控制信道上使用 CSMA MAC 协商信道允许多个 SU 同时传输,可有效利用频谱。

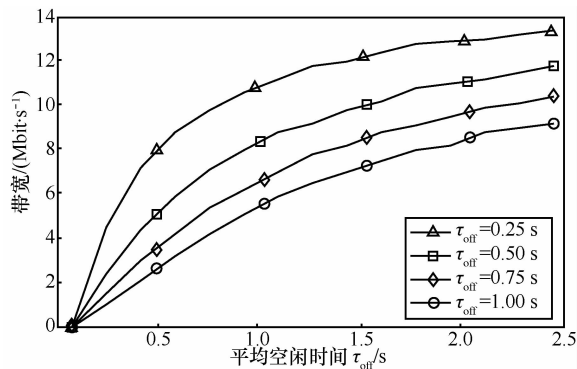


图5 改变 τ_{off} 后 SU 的聚合带宽

帧持续时间也影响可实现的带宽以及 T_{on} 和 T_{off} , 图6所示为通过改变 SU 密度获得的在各种 T_f 值处的聚合带宽,其中, $\tau_{off}=0.5$ s, $\tau_{on}=0.5$ s, $M=20, C=20$ 。从图6可看出,随着 SU 数目的增加,由于感知和利用到的传输机会的数目的增加,聚合带宽显著增加。但 40 个用户趋势变平滑,因为频谱可用性变为瓶颈,而且在较大的数据帧周期 T_f 内实现的带宽更大, T_f 增加 4 倍,即从 10 ms 到 40 ms,带宽约增加 2 倍。对于更大的 T_f 值,该增加不能持续,如图3所示。因此,利用认知无线电动态切换至不同信道的能力,可显著提高聚合带宽。

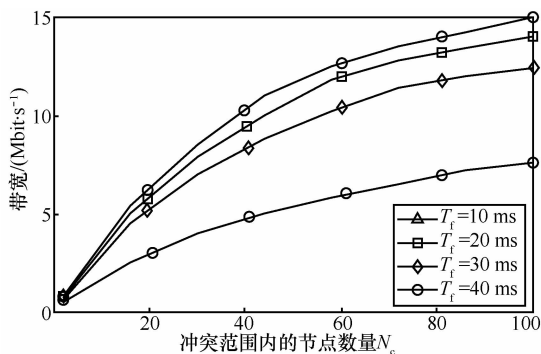


图6 改变帧周期时 SU 的聚合带宽

4.2 多信道访问中的时延

为了评估认知无线电访问多个信道的潜力,针对给定数目的信道在各种业务场景下执行了仿真实验。

(1)保持 PU 数目不变,在 PU 的不同活跃周期下改变 SU 的到达率

记录时延情况,如图7所示。其中, $\tau_{off}=0.5$ s, $\tau_{on}=0.5$ s, $M=20, C=20$ 。当 $\tau_{on}=0.15$ s 和 $\tau_{on}=0.30$ s 时,在较低 PU 活跃度下, SU 的所有可用信道均得到充分利用,使得 SU 帧周期具有非常小的时延,这是由于 SU 公共控制信道协商后,在低 PU 活跃度下同时利用了各种可用控制信道。反之,参考文献[14]中的时延开始呈线性增加,甚至在低 PU 活跃度下,随着 SU 数目的增加,并不适用于 CRSN。尽管本文方法刚开始时延随着 SU 数目的增加呈指数增加,却只发生在较高 PU 活跃度处,即 $\tau_{on}=0.6$ s。因此,能够以较低的时延同时访问多个信道,证明了 CRSN 良好的性能。

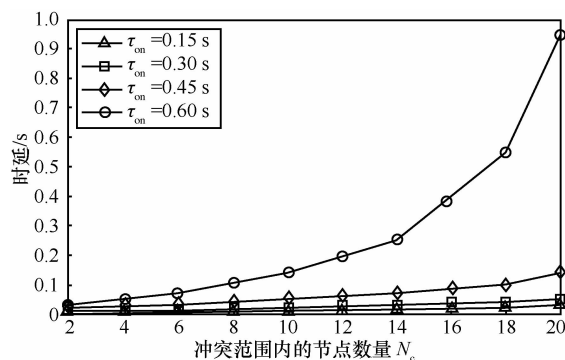


图7 改变 LPQ 中 SU 到达率时 SU 的数据分组时延

(2)在各种 SU 帧周期下通过改变 PU 的数目分析 SU 的时延

在较低帧周期处,服务率较高,导致 LPQ 中队列等待时间较短,如图8所示,其中, $\tau_{off}=0.5$ s, $\tau_{on}=0.5$ s, $N_c=10, C=20$ 。对于 $T_f=10$ ms 和 $T_f=20$ ms,观察到的平均数据分组



时延接近较低 PU 到达率时的帧周期,随着 PU 数目的增加,时延增加到 100 ms。但对于较大的帧周期,该增加有多个数量级,当 $T_f=40$ ms 时呈指数形式增加。因此,为了获得较小时延,应保持较小的 SU 帧周期,从而改善 LPQ 的服务率。

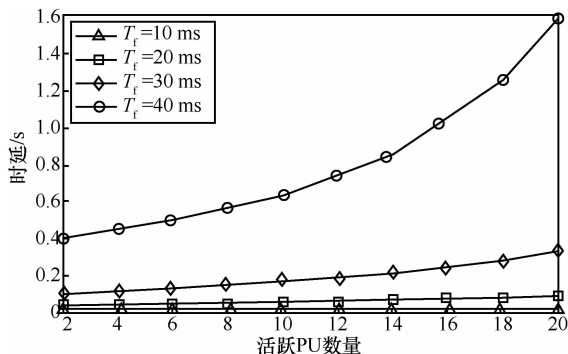


图8 改变LPQ中PU数目时的数据分组时延

此外,通过改变PU的活跃周期分析了PU活跃度对SU数据分组时延的影响,如图9所示,其中, $\tau_{on}=0.5$ s, $M=20$, $C=20$, $N_c=10$ 。观察到的趋势与图8的趋势类似,其中,在较高活跃周期处,时延呈指数增加,因为它超过50%的时间间隔,但是,若帧周期较小, $T_f \leq 20$ ms,则时延低至200 ms,但吞吐量降低了。因此,在各种PU业务场景下估计SU数据分组时延,通过改变SU帧周期可以进行控制。

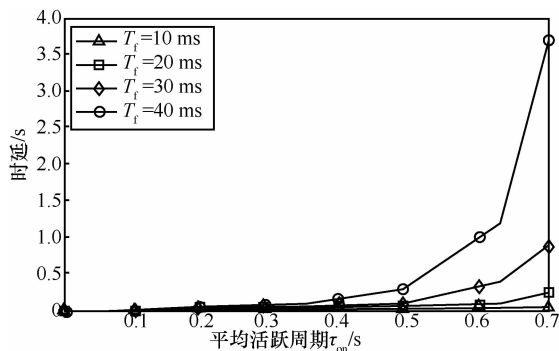


图9 改变PU活跃周期时SU的数据分组时延

5 结束语

本文在给定的PU业务模型下为SU制定了性能指标:带宽和时延,研究了其与动态变化的各种参数的关系。基于MAC协议,利用专用控制信道协商SU的发送方与接收方之间的业务信道利用情况。分析结果表明,通过分布式信道协作结合CSMA的并发传输,聚合带宽增加了5倍,

且在较高PU活跃度下,SU到数据分组的时延非常低,通过改变各种网络参数:帧周期、SU数目和PU活跃度,数据分组时延可以得到有效控制。

通过在CRSN中同时利用不同的可用信道研究了认知无线电的性能,未来会将其应用于其他带有QoS指标或对应用程序有特定需求的新领域。

参考文献:

- [1] 刘利洋. 认知无线电传感器网络的协作频谱感知方法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
LIU L Y. A cooperative spectrum sensing method in cognitive radio sensor network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [2] 谢树京, 沈连丰. 认知无线网络中基于D-S证据理论的合作频谱感知方法[J]. 电信科学, 2013, 29(8): 114-118.
XIE S J, SHEN L F. A cooperative spectrum sensing method based on D-S evidence theory in cognitive radio network [J]. Telecommunications Science, 2013, 29(8): 114-118.
- [3] ZHENG L, TAN C W. Cognitive radio network duality and algorithms for utility maximization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(31): 500-513.
- [4] 刘权, 赵光胜, 王晓东, 等. 认知无线网络信道交汇研究综述[J]. 软件学报, 2014, 25(3): 606-630.
LIU Q, ZHAO G S, WANG X D, et al. The review of channel intersection research in cognitive radio network [J]. Journal of Software, 2014, 25(3): 606-630.
- [5] WANG X, GAO Z, FANG Y, et al. A signal modulation type recognition method based on kernel PCA and random forest in cognitive network [J]. Intelligent Computing Methodologies, 2014, 27(14): 522-528.
- [6] STOTAS S, NALLANATHAN A. Overcoming the sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks [C]// 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 23-27, 2010, Cape Town, South Africa. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [7] 刘超, 张顺颐. 基于遗传算法的认知无线网络共同信道和功率最优分配[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2013, 32(6): 74-79.
LIU C, ZHANG S Y. The optimal allocation of common channel and power based on generation algorithm for cognitive radio network [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science, 2013, 32(6): 74-79.
- [8] SHI Z, BEARD C, MITCHELL K. Analytical models for understanding space, backoff, and flow correlation in CSMA wireless networks [J]. Wireless Networks, 2013, 19 (3): 393-409.

- [9] 郑仕链, 杨小牛. 认知无线电频谱切换目标信道访问机制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2213-2217.
ZHENG S L, YANG X N. Spectral switch target channel access mechanism of cognitive radio [J]. Journal of Electronics and Information, 2012, 34(9): 2213-2217.
- [10] 王钦辉, 叶保留, 田宇, 等. 认知无线网络中频谱分配算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 147-154.
WANG Q H, YE B L, TIAN Y, et al. A spectrum allocation algorithm in cognitive radio network[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 147-154.
- [11] BICEN A O, GUNGOR V C, AKAN O B. Delay-sensitive and multimedia communication in cognitive radio sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(5): 816-830.
- [12] 陈建白, 郑宝玉, 褚御芝, 等. 认知无线网络中次用户的一种协作传输策略[J]. 信号处理, 2013, 28(10): 1432-1438.
CHEN J B, ZHENG B Y, ZHU Y Z, et al. A collaborative transmission strategy of secondary user in cognitive radio network[J]. Signal Processing, 2013, 28(10): 1432-1438.
- [13] DE DOMENICO A, STRINATI E C, BENEDETTO M D. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(1): 21-44.
- [14] EL-SHERIF A A, SADEK A K, LIU K J R. Opportunistic multiple access for cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 704-715.
- [15] CHANG C Y, HUNG L L, CHANG C T, et al. A cognitive radio MAC protocol for exploiting bandwidth utilization in wireless networks [C]//9th International IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), July 1-5, 2013, Sardinia, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1774-1779.
- [16] 胡静, 沈连丰, 宋铁成. 基于 QoS 的认知无线网络 MAC 协议[J]. 东南大学学报: 英文版, 2013, 28(4): 375-379.
HU J, SHEN L F, SONG T C. The MAC protocols based on QoS in cognitive wireless networks [J]. Journal of Southeast University: the English Version, 2013, 28(4): 375-379.

[作者简介]



刘莹(1981-),女,四川工程职业技术学院电气信息工程系讲师,主要研究方向为无线网络、WSN等。



郑黎(1981-),男,四川工程职业技术学院电气信息工程系讲师,主要研究方向为无线网络、信息安全等。



黎远松(1970-),男,四川理工学院计算机学院副教授,主要研究方向为无线网络、物联网等。